

Téledétection et estimation des rendements en blé en Europe

Soizik Laguette, Alain Vidal et Paul Vossen

En 1996, le budget de la PAC (Politique Agricole Commune) était de 87 milliards d'ECU, soit 47 % du budget total de l'Union européenne. Au niveau mondial, la production de blé estimée de l'Union européenne (99,9 millions de tonnes) représentait alors 17 % de la production mondiale totale de blé (588 millions de tonnes¹). En 1991, trois des dix premiers pays mondiaux producteurs de blé étaient européens (France, Royaume-Uni, Allemagne). On peut alors aisément comprendre que l'Union européenne (UE) ait besoin, le plus tôt possible avant la récolte, d'informations sûres, indépendantes et précises sur les rendements des cultures pour gérer le marché communautaire et déterminer les orientations européennes vis-à-vis du marché mondial. Aux USA, les prévisions de rendement sont réalisées à partir de données économiques et d'informations fournies par les systèmes de télédétection et des informations météorologiques et agrométéorologiques par une quarantaine d'experts travaillant sur neufs groupes de production agricole (Vignolles, 1997).

Pour pallier la difficulté et le coût d'une prédiction de rendement à l'échelle régionale par des méthodes classiques (prélèvement d'échantillons de matière sèche et pesage), les décideurs européens doivent se tourner vers l'emploi de nouvelles solutions répondant à la nécessité d'une utilisation opérationnelle. Les modèles agrométéorologiques, basés sur une simulation de la croissance des cultures, et utilisés depuis de nombreuses années, semblent pouvoir répondre à ces différents besoins de la PAC. Depuis plusieurs années la télédétection est introduite dans certaines études comme outil

complémentaire pour l'estimation des rendements. L'utilisation de la télédétection au titre de la PAC est relativement récente. Les premiers travaux ont commencé en 1987 en collaboration avec la Direction générale de l'Agriculture (DG VI), le Centre Commun de Recherche (CCR) d'Ispra (Italie) et l'Office des statistiques de la Commission européenne, EUROSTAT. Cette collaboration est communément appelée le « projet MARS » (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*). Une des activités du projet MARS est le « Système Avancé d'Information Agricole » qui combine l'utilisation de données satellitaires de basse résolution et les sorties d'un modèle agrométéorologique de simulation de croissance des cultures. Les sorties de ce modèle sont disponibles depuis 1993.

De fait, au sein du projet MARS, les prévisions de rendement reposent actuellement sur une procédure utilisant une version du modèle agrométéorologique WOFOST adaptée aux besoins de l'Union européenne. L'utilisation en parallèle de données satellitaires permet d'obtenir une information d'ordre plutôt qualitative. Afin d'atteindre une prévision quantitative plus fiable, les responsables du projet MARS souhaitent améliorer la procédure déjà existante en introduisant au sein même de modèles des données de télédétection, notamment pour prendre en compte les effets du stress (plus particulièrement le stress hydrique) sur le rendement.

L'étude présentée ici a pour but de développer et de proposer une procédure (améliorant ou remplaçant la procédure existante) de suivi du blé et d'estimation des rendements à l'échelle européenne,

1. Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Perspectives de l'alimentation, système mondial d'information et d'alerte rapide sur l'alimentation et l'agriculture, Rome n° 1/2, jan./fév., 1997.

**Soizik Laguette
et Alain Vidal**
Cemagref
BP 5095, 361 rue
J.-F. Breton
34033 Montpellier
Cedex 01
Paul Vossen
Union européenne
DG XXIV : Politique
des consommateurs
et protection de
leur santé.
21020 Ispra
(Varese), Italie

2. NOAA-AVHRR :
National Oceanic
and Atmospheric
Administration -
Advanced Very High
Resolution
Radiometer.

à l'aide d'une utilisation combinée de données satellitaires (provenant du satellite NOAA-AVHRR²) et d'un modèle agrométéorologique. Elle s'inscrit dans le cadre des programmes de recherche et développement financés par l'Union européenne. Le Cemagref y a été associé pour ses compétences en télédétection appliquée au suivi de la végétation. La problématique européenne (prévisions de rendement obtenues le plus tôt possible dans la saison, à l'échelle de la grande région d'intérêt) demande l'utilisation de modèles robustes, pouvant être appliqués à une grande échelle (> 10 000 km²) et en temps réel. Ces critères ont dirigé notre choix vers l'utilisation de modèles d'efficacité qui représentent la production de matière sèche par unité de temps comme le produit du rayonnement solaire, et d'efficacités traduisant la conversion de l'énergie solaire en carbone.

■ La démarche

Un des modèles d'efficacité le plus communément appliqué est celui de Monteith (Monteith, 1972), car certains de ces paramètres peuvent être exprimés en fonction de données satellitaires. Pour ces raisons nous avons retenu ce modèle pour la suite de notre étude. Les données utilisées au cours de l'étude sont issues de la procédure actuelle de prévision de rendement fonctionnant au sein du projet MARS. Cette procédure (procédure WOFOST) est basée sur le système CGMS (*Crop Growth Monitoring system*) (Vossen et Rijks, 1995) dont la recherche et le développement ont été coordonnés par le CCR. Il s'agit d'une version modifiée et réadaptée du modèle agrométéorologique WOFOST (Van Diepen *et al.*, 1989). Ces données sont de deux types :

- les données météorologiques et agrométéorologiques, qui sont soit les données sorties de la procédure WOFOST (données décadales), soit extraites de la base de données centralisée de la Commission européenne (la base de données centralisée est constituée d'une extrapolation à une grille de 50 x 50 km des données météorologiques journalières issues des stations synoptiques européennes). Ces données sont fournies pour la maille de 50 x 50 km, elles sont à un pas de temps journalier ou décadaire ;
- les données satellitaires proviennent du satellite météorologique NOAA-AVHRR qui donne accès à deux variables : un indice de végétation et un

indice de stress (encadré 1). Les données brutes sont traitées par la chaîne de traitement SPACE (Millot, 1995) développée à l'intérieur du projet MARS au CCR. Après élimination des pixels nuageux, les données initiales, au format NOAA-AVHRR (pixels de 1,1 x 1,1 km), sont mises au format de la maille 50 x 50 km.

L'étude est réalisée sur cinq années (1990 - 1994) et sur six régions européennes composées, chacune, de quatre à neuf carrés de la maille de 50 x 50 km recouvrant l'Europe (carte 1). Ces six régions répondent à deux critères : leur occupation du sol agricole est majoritaire en blé (> 50 %) ; elles sont localisées selon un gradient nord-sud.

L'objectif de l'étude est double :

- le premier objectif est d'intégrer dans un modèle d'efficacité de type modèle de Monteith, une expression du stress de la culture, basée sur la température de surface (Ts) NOAA-AVHRR, jusqu'à présent peu prise en compte dans les modélisations de ce type ;
- le second objectif est d'améliorer la procédure de prévision de rendement actuellement utilisée par l'UE, en prenant en compte une mesure du stress subi par les cultures – mesure obtenue par télédétection (figure 1a).

Bases théoriques : du modèle de Monteith au modèle 3M

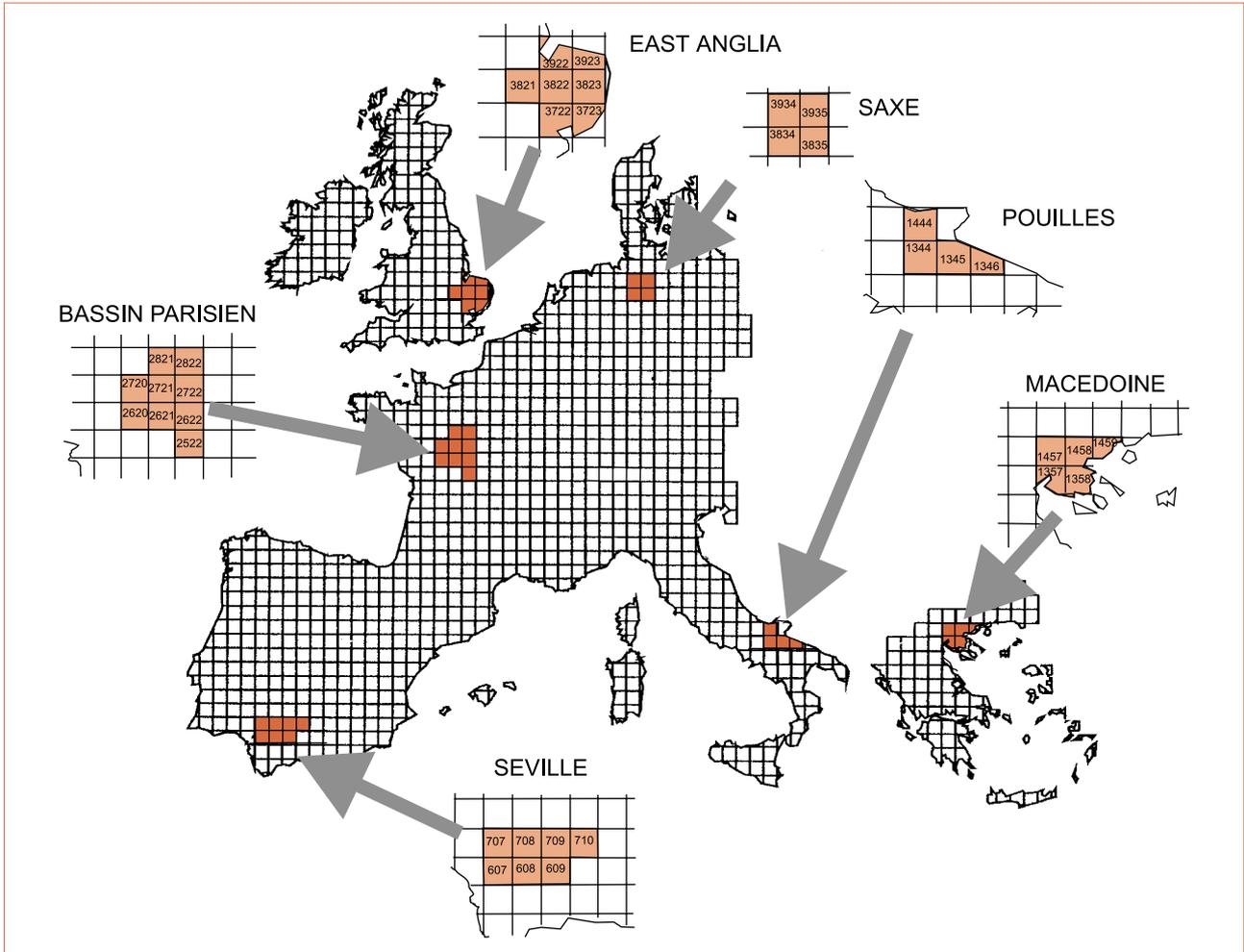
Le modèle de Monteith (1972) simplifié par Varlet-Grancher (1982) définit la matière sèche d'une plante (DM) comme la résultante de l'assimilation du rayonnement global Rg, à travers un jeu de trois efficacités :

$$DM = \int_t \epsilon_s \epsilon_i \epsilon_c R_g dt \quad [1]$$

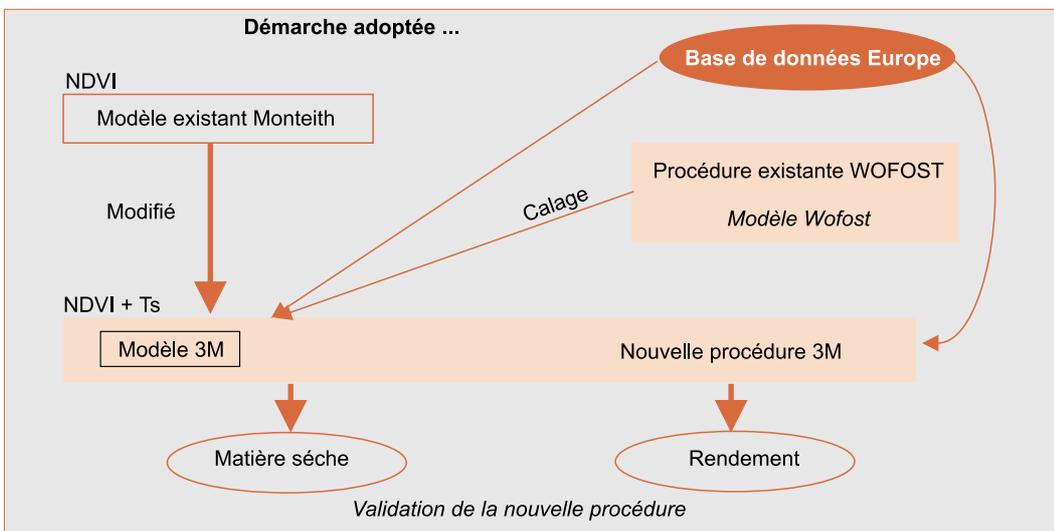
L'efficacité climatique ϵ_s (adimensionnelle) est la part du Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR) utilisée par la plante pour sa photosynthèse. L'efficacité d'interception ϵ_i (adimensionnelle) est le rapport entre le PAR intercepté par le couvert végétal et le PAR incident. L'efficacité de conversion ϵ_c (g/MJ) est le facteur de conversion du PAR intercepté en biomasse.

■ L'efficacité climatique

L'efficacité climatique ϵ_s est le rapport entre le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)



▲ Carte 1. – Localisation des régions test et des numéros de la grille CGMS correspondants.



◀ Figure 1a. – Principe de la démarche adoptée.

Encadré 1

Les caractéristiques du satellite météorologique NOAA-AVHRR

- AVHRR : (Advanced Very High Resolution Radiometre) : Radiomètre intéressant pour le suivi de la végétation
- Type : Héliosynchrone
- Altitude nominale : $\cong 850$ km
- Période orbitale : 102 mn
- Passage au-dessus du même point : 12 heures (passage exact tous les 9,2 jours)
- Passage à l'équateur :
heure solaire - noeud descendant : 2 h 30,
noeud ascendant : 14 h 30
- Champ de l'instrument : $\pm 55,4^\circ$ au nadir
- Résolution au sol (pixel) :
1,1 km au nadir, 6,6 x 2,3 km en bord de champ
- Taille d'une scène : $\approx 2\,700 \times 2\,700$ km
- Caractéristiques spectrales :
canal 1 (0,58–0,68 μm) visible
canal 2 (0,72–1,10 μm) proche infrarouge
canal 3 (3,55–3,93 μm) moyen infrarouge
canal 4 (10,5–11,3 μm) infrarouge thermique
canal 5 (11,5–12,5 μm) infrarouge thermique

Télédétection et suivi de la végétation

Il existe deux paramètres importants pour le suivi de la végétation en télédétection :

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), qui est une combinaison des réflectances dans les longueurs d'onde du Rouge et du Proche Infra Rouge. Cet indice est bien corrélé à la quantité de biomasse et à l'indice foliaire :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

- T_s (température de surface) qui est issue de l'infrarouge thermique. Cet indice est relié à l'évapotranspiration réelle du couvert végétal.

et le rayonnement global. La proportion d'énergie photosynthétiquement active du rayonnement global évolue entre 0,42 (dans le rayonnement direct) et 0,65 (dans le rayonnement diffus) (Monteith, 1972 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1982). Les modifications de la composition spectrale de l'énergie du rayonnement utile à la photosynthèse en conditions naturelles ont théoriquement peu d'effet sur la réponse photosynthétique théorique (McCree, 1972) ; une valeur moyenne, que nous retiendrons de 0,5 pour ϵ_s ; est acceptable pour les régions tropicales et tempérées.

■ **L'efficacité d'interception**

ϵ_i est la proportion du PAR interceptée par un couvert végétal par rapport au PAR arrivant à la surface de ce même couvert :

$$\left(\frac{\text{PAR intercepté}}{\text{PAR incident}} \right)$$

L'interception de l'énergie lumineuse par une plante est fonction de sa surface foliaire. Elle peut donc être estimée à partir de l'indice foliaire IF, lui-même relié aux indices de végétation notamment au NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Le NDVI, combinaison des valeurs de réflectance dans le canal rouge et proche infrarouge, donne une indication de l'activité photosynthétique de la biomasse verte et donc de l'indice foliaire. Des études ont montré que cette relation, en conditions hydriques et minérales non limitantes, pouvait être considérée comme linéaire (Asrar *et al.*, 1985; Kumar et Monteith, 1981). Elle peut s'écrire sous la forme :

$$\epsilon_i = \epsilon_{i0} \text{NDVI} + b$$

Cependant le pixel élémentaire de l'étude ayant une superficie de 2 500 km², sa réponse spectrale n'est pas celle d'une occupation du sol unique mais plutôt le reflet d'une occupation du sol mixte. Les valeurs de NDVI des pixels de l'étude sont influencés par cette hétérogénéité de l'occupation des sols : selon les cas, ces valeurs seront supérieures ou inférieures aux valeurs théoriques de la culture étudiée. Pour tendre le plus possible vers un NDVI correspondant à la réponse pure de la culture majoritaire concernée (ici le blé), les valeurs de NDVI sont normalisées. L'expression finale suivante est alors obtenue :

$$\epsilon_i = \epsilon_{i0} \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{sol}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{sol}}} \quad [2]$$

où ϵ_{i0} est une constante, NDVI est la valeur journalière du NDVI, NDVI_{sol} est la valeur minimale observée sur un cycle cultural, NDVI_{max} est la valeur maximale observée sur une période de cinq ans.

■ L'efficacité de conversion

L'efficacité de conversion ϵ_c est définie par Arkebauer *et al.*, (1994) comme « le facteur de conversion entre la quantité de rayonnement interceptée ou absorbée par un couvert végétal et la quantité correspondante de gaz carbonique fixée, ou de biomasse produite ». Cette efficacité peut être évaluée expérimentalement mais les valeurs obtenues sont multiples et variées. Ces variations sont dues à la manière dont trois facteurs peuvent être définis. Ces facteurs sont : la forme de carbone considérée, le rayonnement considéré et l'échelle de temps à laquelle ϵ_c est calculé.

ϵ_c dépend du taux d'échange de carbone des feuilles, donc du mode d'assimilation du carbone par les plantes : les plantes en C4 ont une valeur de ϵ_c supérieure aux plantes en C3. ϵ_c dépend aussi du stade de développement de la plante. Cependant les données montrent clairement une tendance générale de ϵ_c à décroître au fur et à mesure que la saison progresse (Bégué *et al.*, 1991). Globalement, ϵ_c peut être considéré comme constant pour de longues périodes de temps, en conditions climatiques non limitantes. Dans ces conditions le modèle de Monteith simule la productivité potentielle maximale de la culture en estimant la quantité d'énergie interceptée par la culture au cours de son développement.

Toutefois, en conditions réelles, il existe des contraintes climatiques et de sol qui peuvent modifier l'évolution temporelle de l'efficacité de conversion. Tout stress ayant une influence sur l'ouverture des stomates entraîne une baisse de la transpiration, donc une diminution de l'activité photosynthétique et, par voie de conséquence, une diminution de l'efficacité de conversion. Des facteurs externes peuvent provoquer cette fermeture des stomates dont les plus importants sont : la température, la teneur en azote et la teneur en eau.

Pour comprendre le comportement des plantes en plein champ, il est important que la modélisation du rendement traduise, s'il existe, un état de déficit hydrique de la plante. La capacité d'utilisation de l'eau par la plante se traduit par la quantité d'eau transpirée. L'efficacité de conversion est fonction

de la capacité d'échange gazeux des feuilles, elle-même tributaire de l'état hydrique de la plante. Elle dépendra donc de fonctions décrivant les effets physiologiques d'un déficit hydrique. Il est alors nécessaire d'introduire cette notion de déficit hydrique dans l'expression du formalisme de Monteith à l'aide d'un indice de stress.

■ Les indices de stress

Les indices de stress sont généralement construits soit à partir de l'évapotranspiration, le stress pouvant être défini sous la forme $1 - \text{ETR}/\text{ETP}$ (où ETR est l'évapotranspiration réelle et ETP est l'évapotranspiration potentielle), soit à partir de la température de surface, T_s .

En effet, dès qu'un stress provoque la fermeture partielle des stomates, la température de surface des feuilles augmente jusqu'à devenir supérieure à celle de l'atmosphère (T_a). Ainsi la différence $T_s - T_a$ est une fonction décroissante de l'évapotranspiration réelle de la plante. Jackson *et al.*, 1981, se sont appuyés sur ces connaissances pour donner une autre définition au Crop Water Stress Index :

$$\text{CWSI} = \frac{T_s - T_{s\min}}{T_{s\max} - T_{s\min}} \approx 1 - \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}} \quad [3]$$

Ce concept défini par Jackson pour des couverts végétaux homogènes a été étendu aux couverts végétaux épars par Moran *et al.*, (1994). En posant l'hypothèse que ϵ_c est maximal pour une évapotranspiration LE égale à l'évapotranspiration potentielle ETP, et nul pour une évapotranspiration nulle, on peut écrire :

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0}(t) \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}} \quad [4]$$

Jackson *et al.*, (1986) constatent qu'une plante entre en état de stress pour une valeur de CWSI de l'ordre de 0,4 à 0,5. L'équation [3] est définie pour un couvert végétal homogène. Cependant comme nous l'avons déjà remarqué dans le cas de l'efficacité d'interception, à l'échelle de cette étude, il n'est plus possible de parler de couvert homogène. L'hétérogénéité du couvert explique les valeurs de CWSI très disparates que nous observons. Nous avons donc cherché à redéfinir un indice de stress, que nous appelons SI, dérivant du CWSI et s'ajustant le mieux possible à nos données « hétérogènes ». Ce nouvel indice SI répond aux conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \text{SI} &= 0 && \text{si } \text{CWSI} \leq 0,45 \\ \text{SI} &= -0,82 + (1,82 \text{ CWSI}) && \text{si } \text{CWSI} > 0,45 \end{aligned}$$

En couplant [3] et [4], ϵ_c prend la forme suivante :

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0}(t) (1 - \text{SI}) \quad [5]$$

où ϵ_{c0} est fonction du temps t , et SI est l'indice de stress défini ci-dessus.

Les différents termes du formalisme de Monteith ainsi exprimés, nous obtenons un nouveau modèle, le Modèle de Monteith Modifié ou modèle 3M, s'écrivant sous la forme suivante :

$$\Delta \text{DM} = (\epsilon_{i0} \text{NDVIn}) (\epsilon_{c0}(t) [1 - \text{SI}]) 0,5 \text{ Rg} \quad [6]$$

où

– ΔDM (g/m^2) est la matière sèche produite durant un temps Δt (décade),

– NDVIn est le NDVI normalisé ayant comme formule :

$$\frac{\text{NDVI} - \text{NDVIsol}}{\text{NDVImax} - \text{NDVIsol}}$$

– SI (g/MJ) est l'indice de stress défini précédemment,

– Rg est la radiation globale (MJ/m^2),

– 0,5 est la valeur retenue pour l'efficacité climatique ϵ_s ,

Dans cette formulation du modèle 3M, deux paramètres sont inconnus : ϵ_{i0} et ϵ_{c0} . Ils ont été regroupés sous le terme ϵ_0 , produit des valeurs maximales des efficacités d'interception et de conversion. Il nous permet de représenter le modèle 3M avec un paramètre unique et trois variables : NDVIn, SI et Rg. L'expression de ϵ_0 est la suivante :

$$\epsilon_0 = \epsilon_{i0} \epsilon_{c0} = \frac{\Delta \text{DM}}{0,5 \text{ NDVIn} (1 - \text{SI}) \text{ Rg}}$$

Dans un premier temps ϵ_0 est modélisé. Puis, dans un second temps, nous retournerons à la matière sèche produite puis au rendement et nous comparerons la procédure existante WOFOST et la nouvelle procédure 3M (tableau 1).

Les résultats

Une modélisation simple de ϵ_0 est nécessaire pour pouvoir obtenir une estimation de la matière sèche.

Cette modélisation basée sur la notion de longueur du jour et de somme de degrés jour, est réalisée sur des années de référence. Parmi les cinq années de l'étude (1989-1994), une année par région test est sélectionnée en fonction de la dispersion du nuage de points formé par les ϵ_0 calculés. L'année pour laquelle le nuage de points a la dispersion la plus faible est considérée comme l'année de référence.

■ L'évolution temporelle de ϵ_0

La représentation des ϵ_0 en fonction du temps, par régions et pour les années de référence (figure 1), met en évidence une évolution qui dépend du stade de développement de la culture. Trois phases successives correspondant à des phases de développement physiologique du blé sont délimitées par les points t_0 , t_1 , t_2 et t_3 . Une première phase (t_0 - t_1), ou phase initiale, correspond à la phase végétative du développement du blé. Elle cadre avec la période du tallage. La seconde phase (t_1 - t_2), ou phase plateau, commence au début de la montaison (t_1) et finit au début de la période épiaison-anthèse (t_2). Cette phase plateau correspond donc à la phase de reproduction du blé. Enfin la troisième (t_2 - t_3), ou phase descendante, correspond à la phase de maturité. Elle débute avec l'anthèse (point t_2) et se termine au stade maturité-remplissage du grain (point t_3). La valeur de ϵ_0 est égale à zéro dès que la production de matière sèche s'arrête.

■ Calage et modélisation de ϵ_0

t_0 , t_1 , t_2 et t_3 correspondent à des stades précis du développement de la culture et leurs dates d'apparition doivent être correctement définies pour permettre la modélisation des trois phases évolutives de ϵ_0 . Chaque date d'apparition est définie et calée en fonction de références phénologiques du blé. Pour ce faire, nous nous baserons sur la photopériode (répartition durant un jour entre la phase diurne et la phase obscure) et la température (définie dans le cadre de cette étude, comme l'intégration des températures atmosphériques, en fonction du temps, à partir d'une température de base), qui sont les variables environnementales les plus importantes pour caractériser le développement phénologique du blé.

Le calage des points caractéristiques

– t_0 correspond au début de la phase de tallage qui est atteinte pour une photopériode comprise en-

	WOFOST	3M
Type	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle mécaniste 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'efficience (modèle de fonctionnement).
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • Décrit, en fonction des connaissances actuelles, les différents processus de la croissance et du développement des plantes permettant d'arriver à une valeur du rendement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Décrit, par une approche simplifiée, les mêmes processus que les modèles mécanistes. Certains processus détaillés sont remplacés par des approches empiriques.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Déterministe 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 constante et 3 variables uniquement • Informations satellitaires, donc instantanées et spatialisées sur l'état du couvert végétal.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre important de paramètres devant être calibrés pour chaque culture. • N'utilise pas de données satellitaires et donc pas d'informations instantanées ni spatialisées sur le couvert végétal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus empirique

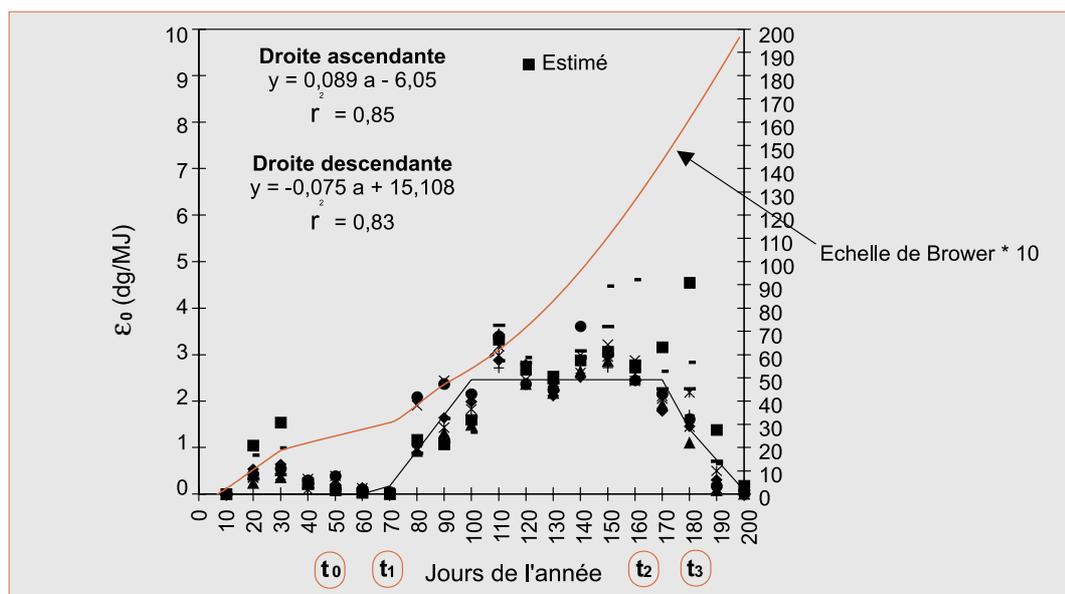
tre 9,8 heures et 14 heures en fonction de la localisation des régions concernées (Russel, 1994).

Nous posons deux règles pour définir t_0 : la photopériode doit être comprise entre 10 h et 14 h et ϵ_0 doit se trouver entre les stades 2 et 4 de l'échelle de Brower (échelle de référence de la croissance

du blé utilisée par la procédure WOFOST - annexe 1).

– t_1 marque le début de la phase plateau et correspond à la montaison, c'est-à-dire à l'initiation florale. En nous basant sur les connaissances déjà acquises et sachant que le blé est une plante de

▲ Tableau 1. – Caractéristiques comparées des procédures WOFOST et 3M.



▲ Figure 1. – Bassin Parisien, 1993, année de référence. Evolution de ϵ_0 sur les carrés élémentaires formant la région (chaque série de symboles correspond à un des carrés élémentaires constituant une région test). Comparaison avec la valeur régionale des stades de développement de l'échelle de Brower. ϵ_0 est modélisé par deux droites de régression ascendante et descendante, et un plateau.

Annexe 1. – Échelle de Brower - échelle de phénologie du froment (d'après Falisse, 1992). ▼

	N°	Stades de développement de l'apex et de l'inflorescence	Stades de développement visibles du froment d'hiver Brower	
Période végétative		Germination Croissance de la plantule	Semis - Émergence	
	1	L'apex a un <i>primordium</i> foliaire	1 Une feuille de la pousse apparaît stade 1 feuille - stade 2 feuilles - stade 3 feuilles	
		Tallage		
	2	L'apex a 2, 3 <i>primordia</i> foliaires	2 Début tallage	
	3	L'apex allongé a 4 (et plus) <i>primordia</i>	3 Talles formés (la plante est presque « rampante » et couchée). Les feuilles sont souvent enroulées en spirales.	
	4	Passage de la production de <i>primordia</i> foliaires à celle de <i>primordia</i> d'épillets (stade doubles rides)	4 Fin tallage (les pseudotiges commencent à se redresser et les gaines des feuilles à s'allonger).	
	5	Début de la différenciation des épillets	5 Début de la montaison (les pseudotiges formées par les gaines foliaires sont très redressées). C'est le stade redressement.	
Période de reproduction		Montaison		
	6	Développement des épillets avec ébauches latérales	6 Stade 1er nœud	
	7	Apparition des ébauches de glumes.	7 Stade 2ème nœud (début de la montée ; la vraie tige est visible)	
	8	Apparition des <i>primordia</i> floraux pointus avec différenciation nette, interne et externe, des glumes.	8	
	9	Apparition des ébauches d'étamines dans la première fleur de 3 (ou plus) épillets		
	10	Croissance des arêtes (l'arête des lemma et l'épillet sommital sont visibles).	8 La dernière feuille est visible et est encore enroulée. L'épi commence à gonfler.	
	11	Les arêtes de lemma sont plus longues que l'épillet, dans 2 ou plus de 2 épillets		
	12	Les organes floraux sont recouverts par les glumes dans la plupart des épillets	9 Stade de la ligule (la ligule de la dernière feuille est visible, la gaine foliaire gonflée à cause de l'épi enfermé).	
	13	Les organes floraux sont recouverts par les glumes dans tous les épillets	10 La dernière gaine foliaire s'ouvre (la gaine est complètement en dehors, l'épi gonflé repousse les gaines des feuilles).	
	14	Stade de réduction du nombre de fleurs		
		15	Épiaison	11 Début de l'épiaison (les premiers épis commencent à émerger de la fente de la gaine)
				12 50 % des épis sont sortis de leur gaine d'un quart
			13 50 % des épis sont sortis de leur gaine d'un demi	
			14 50 % des épis sont sortis de leur gaine de trois quart	
			15 Fin de l'épiaison (tous les épis sont complètement visibles)	
		Floraison	16 Début floraison (les éléments sortent des épillets) La floraison est finie au sommet de l'épi	
	16	L'ovaire commence à gonfler	17 La floraison est terminée à la base de l'épi. Fin de floraison. Formation du grain (maturité liquide du grain).	
	17	Les glumes sont remplies à moitié avec le grain		
Maturation du grain			18 Maturité laiteuse (les grains verts ont leur taille finale et un contenu laiteux) Maturité pâteuse (les grains jeunes-verts ont un contenu amidonneux et sont encore aisément écrasables ; les feuilles sèchent et meurent ; les nœuds de la tige sont encore verts ; les glumes jaunes ont des stries vertes).	
			19 Maturité jaune (les grains mi-durs sont jaunes, luisants et un contenu ferme ; les glumes sont jaunes, les feuilles sont sèches, les nœuds sont jaunes avec des stries vertes)	
			20 Maturité complète (les grains durs sont difficilement coupés par l'ongle : la plante est sèche)	
			21 Maturité morte (les chaumes sont morts) Maturité prématurée (les grains sont prématurément mûrs).	

jours longs nous définissons les règles suivantes : la longueur du jour doit être supérieure à 12,2 heures et la somme de degrés jour, à partir de la période des semis, doit être supérieure ou égale à 1 200 °C.j ($t_b = 0$ °C) (Russel, 1994). Les deux règles doivent être satisfaites simultanément.

– t_2 , fin du plateau, correspond à la fin de la floraison c'est-à-dire la fin de la phase reproductive. La période t_1 - t_2 regroupe la montaison et l'épiaison jusqu'à l'anthèse. t_2 peut être défini comme apparaissant 850°C.j environ après t_1 (Meynard, 1994 ; Russel, 1994). En résumé, t_2 correspond à la somme des degrés.jours des trois étapes du développement du blé mentionnées ci-dessous :

- 550°C.j ($t_b = 0$ °C), correspondant au temps écoulé de la montaison à l'épiaison,
- 150°C.j ($t_b = 0$ °C), équivalant à la période comprise entre l'apparition des premiers épis à la fin de l'épiaison, quand tous les épis sont complètement visibles,
- 150°C.j ($t_b = 0$ °C), étant « la somme de degrés jour » écoulée après l'épiaison.

– t_3 indique que la maturité du blé est atteinte. En nous appuyant toujours sur des connaissances bibliographiques, nous retiendrons pour définir t_3 une somme de degrés jour moyenne de 590°C.j depuis t_2 (Russel, 1994).

La modélisation de ϵ_0

Les points caractéristiques étant calés, ϵ_0 peut être modélisé. La modélisation est faite de façon différente selon que l'on considère la phase ascendante et descendante ou la phase plateau.

– Les phases ascendantes (t_0 - t_1) sont modélisées par région en calculant la droite de régression du nuage de points formé par les valeurs décadaires

de ϵ_0 (figure 1) de cette première phase (t_0 - t_1). Pour la phase descendantes (t_2 - t_3) la même méthode de calcul est appliquée avec les valeurs décadaires de ϵ_0 pour la période (t_2 - t_3).

– La phase du plateau (t_1 - t_2) garde une valeur constante pendant toute sa durée. Cette valeur est celle du dernier point de la droite de régression ascendante correspondant à la valeur de la dernière décade de ϵ_0 , modélisé pour la phase ascendante. (figure 1).

Le tableau 2 montre les jours de l'année correspondant aux quatre points caractéristiques et les valeurs correspondantes de ϵ_0 (dg/MJ) après modélisation des années de référence.

Les RMSE (encadré 2) calculées d'une part pour les ϵ_0 des années de référence, d'autre part pour les ϵ_0 des années autres que celles de références, donnent des erreurs inférieures à 2,2 dg/MJ dans le premier cas et à 1dg/MJ dans le second cas. Ces résultats homogènes mettent en évidence que la procédure développée est stable dans l'espace et dans le temps et qu'elle peut donc être considérée comme valide.

Encadré 2

RMSE

Erreur moyenne quadratique. Tout au long de l'analyse des résultats, nous ne calculerons pas de RMSE à proprement parler, mais plutôt des indices de stabilité calculés sur le mode des RMSE. En effet, la RMSE se calcule entre une population réelle et une population estimée ; or nous n'avons pas de population réelle proprement dite, mais deux populations issues de modèles. Pour plus de simplicité nous garderons cette dénomination de RMSE sans perdre de vue ce que représente exactement cette entité.

Régions	Années de références	t_0		t_1		t_2		t_3	
		Jours	ϵ_0	Jours	ϵ_0	Jours	ϵ_0	Jours	ϵ_0
Bassin Parisien	1993	70	0,204	100	2,884	160	2,884	200	0,05
East Anglia	1992	60	1,143	100	3,409	170	3,409	210	0
Saxe	1993	80	0,450	120	3,623	180	3,623	210	0
Macédoine	1993	70	0	110	4,015	160	4,015	200	0
Pouilles	1994	50	0,691	80	3,166	140	3,166	180	0
Séville	1991	40	0,933	80	3,310	130	3,310	160	0

◀ Tableau 2. – Indication après modélisation des années de référence, des valeurs de ϵ_0 (dg/Mj) selon les régions et le jour de l'année correspondant aux quatre points caractéristiques.

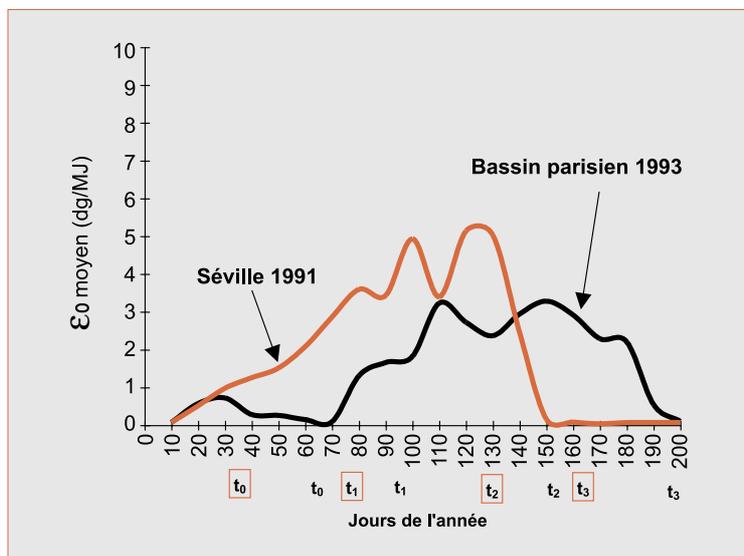
La forme générale de l'évolution temporelle de ϵ_0 est similaire pour toutes les régions. Toutefois ϵ_0 dépend d'un gradient latitudinal : des variations sont observées dans les dates d'apparition des points caractéristiques ainsi que dans la longueur de la phase plateau. Les dates d'apparition des points caractéristiques t_0 , t_1 , t_2 et t_3 sont plus précoces dans les régions sud de l'Europe et la longueur de la phase plateau est plus importante dans les régions nord de l'Europe. La mise en évidence de ce gradient de latitude indique que ϵ_0 , tel qu'il est défini, a bien une signification agronomique par rapport à la culture dominante au sol, ici le blé.

En résumé, l'évolution temporelle de ϵ_0 est dépendante du stade de développement de la culture et son évolution spatiale suit un gradient latitudinal (figure 2).

■ La simulation de la production de matière sèche

Après avoir modélisé ϵ_0 et avoir validé cette modélisation, nous sommes en mesure d'estimer la production de matière sèche du blé à partir de la procédure 3M à l'échelle de la grande région. Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la procédure WOFOST. Enfin dans une dernière étape,

Figure 2. – Évolution de ϵ_0 médian pour une région du sud, Séville 1991 et un région du nord, Bassin Parisien 1993. La position des quatre points caractéristiques met en évidence le gradient de latitude dont dépend ϵ_0



la matière sèche estimée par les deux procédures est confrontée à des valeurs de rendements en grain. Ces rendements sont extraits de la base de données REGIO, constituée à partir des données statistiques EUROSTAT.

La matière sèche produite

Pour les années de référence la matière sèche simulée par la procédure 3M est stable pour une même région et pour une même année. La production de matière sèche, estimée par décade ou cumulée, est identique pour les deux procédures (figure 3).

Pour les années autres que celles de référence, apparaissent dans les régions sud de l'Europe, des décalages importants dans la somme de matière sèche produite tout au long du cycle cultural. Pour la région de Séville en 1993, la matière sèche cumulée estimée par la procédure 3M est beaucoup plus faible que celle estimée par la procédure WOFOST (figure 4). L'Espagne a connu des conditions climatiques de grande sécheresse de 1992 à 1994, notamment en Andalousie en 1993. Dans cette région, la production de blé a été gravement atteinte et certains champs, au lieu d'être moissonnés, ont été directement brûlés. La procédure 3M semble mieux décrire l'impact de la sécheresse sur la production agricole que la procédure WOFOST.

La production de matière sèche estimée par la procédure 3M est comparée à la production de matière sèche estimée par la procédure WOFOST (figures 5 et 6). La comparaison est faite pour les années de référence puis pour les années autres que celles de référence :

- pour les années de références - on observe pour toutes les régions une répartition régulière du nuage de points le long de la droite 1:1. Les coefficients de détermination des droites de régression sont significatifs (figure 5). Ces deux observations confirment le juste choix des années de référence ;

- pour les années autres que les années de référence, les nuages de points sont toujours homogènes mais, pour certaines régions du sud de l'Europe et pour certaines années, ils ne se répartissent plus le long de la bissectrice. Une sous-estimation de la production de matière sèche est observée dans le cas de la procédure 3M par rapport à la procédure WOFOST (figure 6).

Figure 3. – Bassin Parisien 1993 - année de référence - Comparaison de la Σ DM (cumul sur 20 décades) et Δ DM ($\Delta t = 10$ jours) estimées par la procédure 3M et la procédure WOFOST.

■ **Mise en évidence de stress affectant la température de surface T_s**

Un blé stressé avant certaines phases de développement, voit son rendement en grains diminuer. Le blé est particulièrement sensible au stress durant trois périodes : la période avant le tallage, la période de 20 jours avant l'épiaison et la période durant la phase de remplissage du grain. La figure 7 représente l'évolution de l'indice de stress (SI) pour Séville en 1993. Des valeurs élevées de SI avant et pendant le tallage ($t_0 = 40$) et durant les 20 jours précédant l'épiaison mettent en évidence un stress pour la culture.

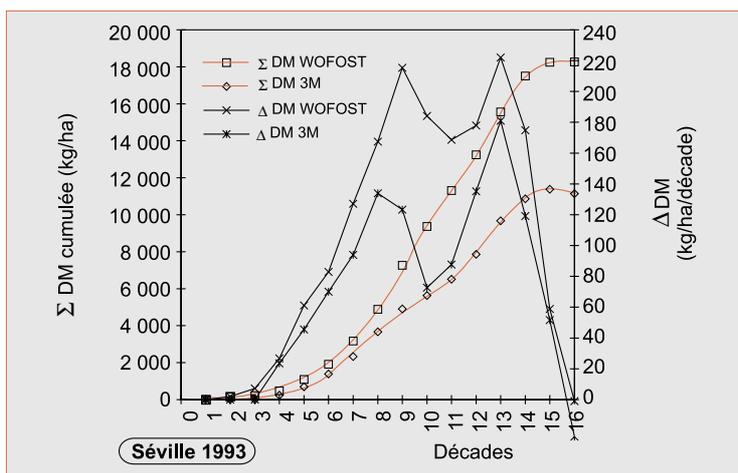
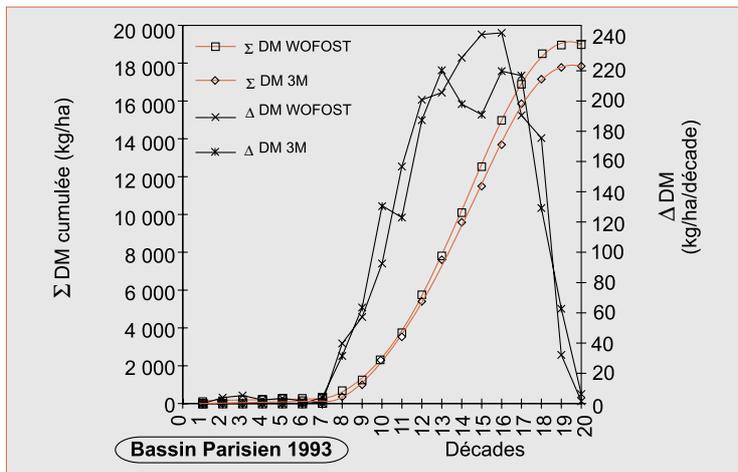
L'utilisation complémentaire du visible (NVDI) et de l'infrarouge thermique (T_s) permet à la procédure 3M d'être sensible non seulement aux variations de la matière sèche mais aussi à toutes perturbations provoquées par un stress affectant la température de surface.

■ **Matières sèche et rendement**

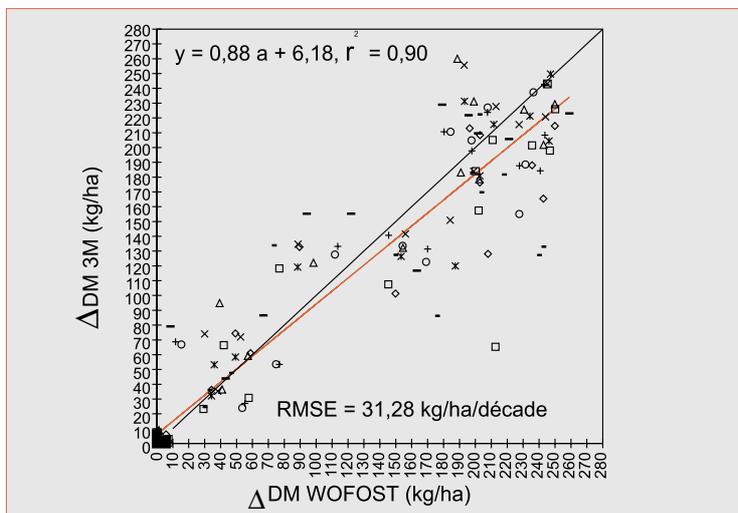
Dans une dernière phase nous confrontons, pour l'ensemble des zones géographiques étudiées, la matière sèche simulée aux données de rendement en grains provenant des statistiques agricoles européennes EUROSTAT. La relation est significative dans le cas de la procédure 3M, avec une coefficient de détermination de 0,59 (figure 8). Par contre, cette même relation est non significative quand on considère la procédure WOFOST : le coefficient de détermination de la droite de régression est égal à 0,024 (figure 8).

Pour la procédure 3M deux grands groupes se distinguent, répartis selon un gradient nord-sud. Le premier groupe « nord » est marqué par des estimations de biomasse élevées, correspondant à des

Figure 5. – Bassin Parisien 1993. Relation de la biomasse estimée par la procédure 3M par rapport à la biomasse estimée par la procédure WOFOST. Chaque série de symboles correspond à un des carrés élémentaires constituant une région test.



▲ Figure 4. – Séville 1993 - année de référence - Comparaison de la SDM (cumulé sur 16 décades) et DDM estimées par la procédure 3M et la procédure WOFOST.

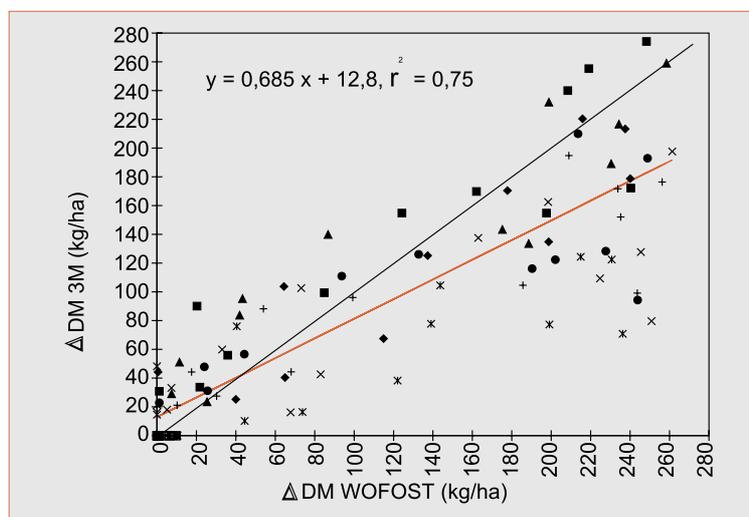


rendements élevés. Le second groupe « sud » se caractérise par des biomasses estimées moins élevées, associées à des rendements plus faibles. Cette constatation n'a aucune signification quant à la qualité des rendements eux-mêmes ; elle met simplement en évidence, pour la procédure 3M, des relations entre quantité de biomasse estimée et rendements observés.

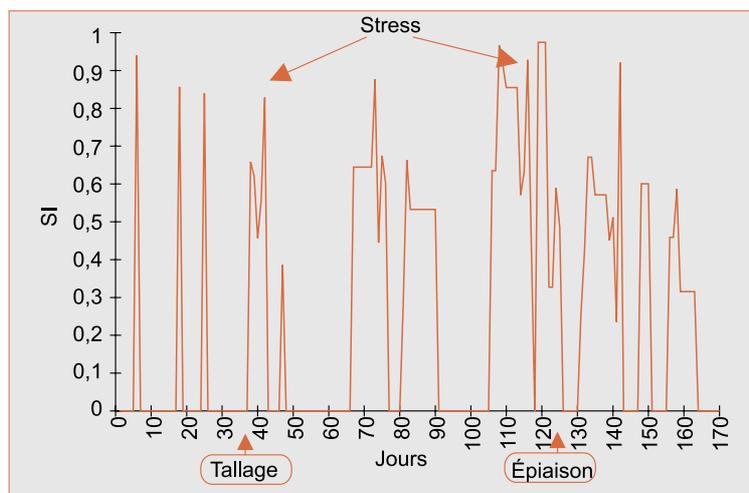
L'ultime étape consiste à calculer les rendements en grains pour les deux procédures, puis à les comparer à des valeurs de rendement observées. Le rendement est calculé à partir de la formule classique faisant intervenir les indices de récolte (les indices de récoltes utilisés ici sont issus de la procédure WOFOST).

Une fois calculés, ces rendements sont confrontés aux rendements fournis par les statistiques agricoles européennes. La figure 9 met en évidence une meilleure corrélation pour la procédure 3M, avec un coefficient de détermination de 0,88 contre un coefficient de 0,61 pour la procédure WOFOST. Les RMSE calculées sont de 2 t/ha pour la procédure WOFOST et de 1,3 t/ha pour la procédure 3M, soit une diminution de l'erreur de la prédiction de 700 kg/ha en faveur de la procédure 3M.

Au total, ces résultats valident la procédure 3M à l'aide de rendements observés. Malgré ses approximations, la procédure 3M permet d'obtenir une prédiction de rendements meilleure que celle estimée par la procédure WOFOST actuellement utilisé au sein du projet MARS.



▲ Figure 6. – Séville 1993 relation de la biomasse estimée par la procédure 3M par rapport à la biomasse estimée par la procédure WOFOST. Surestimation de la biomasse estimée par la procédure WOFOST. Chaque série de symboles correspond à un des carrés élémentaires constituant une région test.



▲ Figure 7. – Évolution de l'indice de stress SI sur la région de Séville en 1993. Avant et pendant le tallage et avant l'épiaison, on observe deux périodes de stress caractérisées par des valeurs élevées de SI.

Conclusion et perspectives

L'objet de ce travail était de mettre au point une procédure permettant à l'Union européenne d'acquiescer avant la récolte des informations quantitatives sur les rendements en blé. La procédure développée propose d'intégrer des données provenant de la base de données centralisée de la Commission européenne dans le modèle 3M. Le modèle 3M est une version modifiée du modèle de Monteith, dans laquelle ont été introduits deux indicateurs reflétant l'état de la culture à un moment donné : un indicateur du fonctionnement photosynthétique du couvert introduit dans l'efficacité d'interception par le biais du NDVI et un indicateur du processus de transpiration de la plante introduit dans l'efficacité de conversion par le biais de la température de surface T_s , intégrée dans un indice de stress SI.

D'un point de vue scientifique, la procédure 3M est mieux adaptée à la prédiction de rendements que la procédure WOFOST. En effet l'introduction de la température de surface dans l'indice de stress SI permet à ϵ_c de retrouver sa fonction d'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en

Figure 8. – Relation rendement vs. Σ DM 3M (gauche) et Σ DM WOFOST (droite) - Les valeurs des rendements proviennent des statistiques agricoles EUROSTAT. Les Σ DM sont celles estimées respectivement par les procédures 3M et WOFOST.

biomasse au lieu d'être un paramètre de calage. Ainsi la procédure 3M permet d'obtenir une meilleure prédiction de la biomasse et de sa transformation en grain. Il semble nécessaire de poursuivre ce thème de recherche pour estimer toute la potentialité de la méthode développée. Dans une perspective scientifique, il serait souhaitable d'appliquer la méthode aux plantes en C4 (le maïs par exemple) et de la valider à une échelle plus fine (parcelle par exemple) : de tels travaux sont poursuivis par l'École Supérieure d'Agriculture de Purpan (Vignolles, 1997).

D'un point de vue opérationnel, la procédure 3M permet d'améliorer significativement l'estimation de la biomasse et des rendements à l'échelle régionale. Sur le plan européen, la procédure 3M représente un réel potentiel pour remplacer ou compléter, en mode opérationnel, les prédictions de la procédure WOFOST. Le projet MARS étudie d'ores et déjà la possibilité d'intégrer la méthode pour une quantification de l'information sur la campagne en cours 1997.

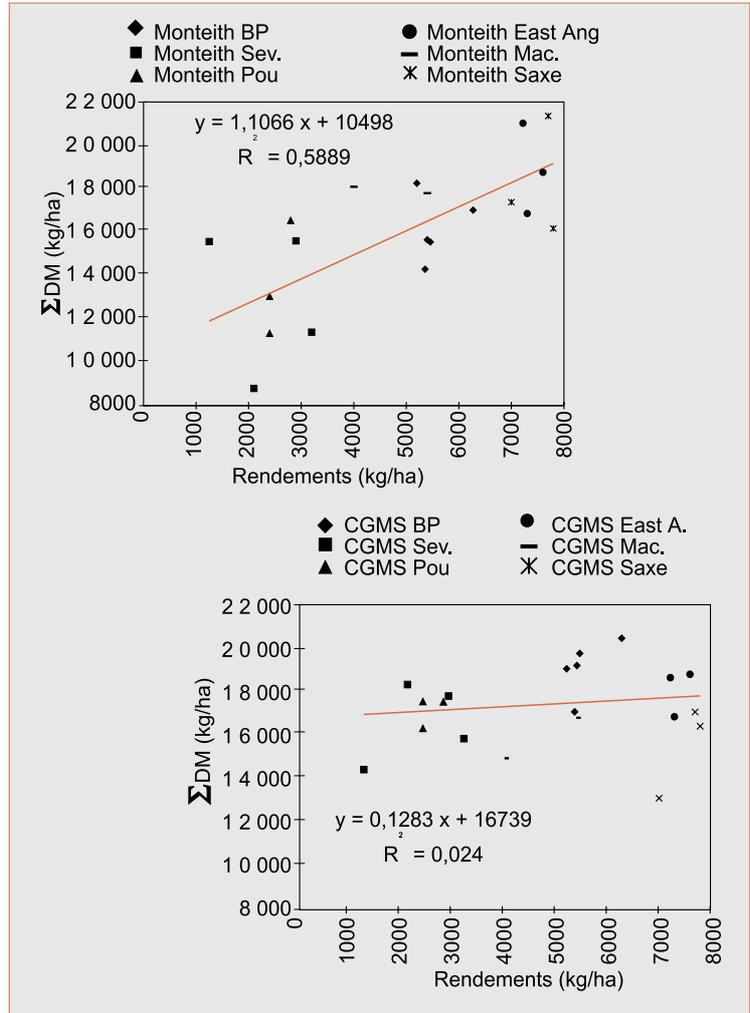
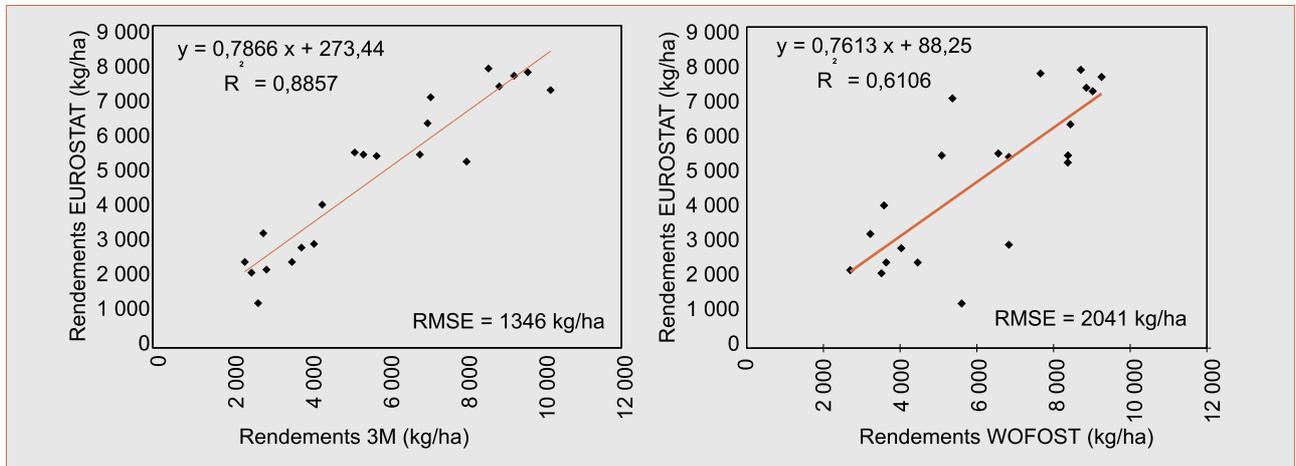


Figure 9. – Relation toutes années et régions confondues entre, les rendements en grain calculés respectivement à partir des procédures 3M et WOFOST, et les rendements (source REGIO) observés.



Résumé

Dans le cadre de sa politique agricole, la Commission européenne doit pouvoir disposer, avant la récolte, de prévisions de rendement plus précises, plus fiables et indépendantes. Une amélioration de l'estimation des rendements peut être faite en combinant l'information qualitative provenant de données satellitaires à l'information quantitative fournie par les modèles de croissance des cultures. L'étude est conduite pour le blé, *Triticum aestivum*, sur six régions de l'Union Européenne et pour cinq années (1990-1994). Les données agrométéorologiques et météorologiques sont extraites de la procédure WOFOST, actuellement utilisée au sein de la Commission européenne. Une nouvelle procédure est développée (la procédure 3M) basée sur le formalisme de Monteith qui définit la production de matière sèche à partir du rayonnement global et de variables issues de données satellitaires : un indice de végétation (NDVI) et un indice de stress (CWSI). Il est montré que la procédure 3M est mieux adaptée que la procédure WOFOST pour la prédiction de biomasse à l'échelle de la grande région.

Abstract

Within the framework of its agricultural policy, the European Commission must be able to make precise, reliable and independent predictions of regional crop yield prior to harvest. Improvements in yield prediction could be obtained by combining qualitative information provided by satellite-based sensors to the quantitative information given by crop growth models. A study was conducted over a five year period (1990-1994) using wheat, *Triticum aestivum*, in six regions of the European Union. Agrometeorological and meteorological data were extracted from the WOFOST, which is currently used within the European Union to predict crop biomass. A new procedure was developed (the 3M procedure) based on the Monteith formalism which defines the production of dry matter based on global radiation and variables obtained from satellites: a vegetation index (NDVI) and a stress index (CWSI). It was shown that the 3M procedure was more successful than the WOFOST procedure for predicting biomass and crop yield at a regional level.

Bibliographie

- ARKEBAUER, T.J., WEISS, A., SINCLAIR, T.R., BLUM, A., 1994. In defence of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah. *Agric. Forest. Meteorol.*, 68:221-227.
- ASRAR, G., KANEMASU, E.T., JACKSON, R.-D., PINTER, P.-J., 1985. Estimation of total above - ground phytomas production using remotely sensed data, *Remote Sens. Environ.*, 17:211-220.
- BÉGUÉ, A., IMBERNON, J., DESPRAT, J.F., 1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques. In : 5^e colloque international « Mesures Physiques et Signatures en Télédétection », Courchevel, France, 14-18 janvier 1991 (ESA SP 319, mai 1991), p. 549-552.
- FALISSE, A., 1992. *Aspects agrométéorologiques du développement des cultures dans le Benelux et les régions voisines : étude pour la betterave sucrière, le colza, le pois, le froment et l'avoine*, Publication EUR 13910 FR of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, 209 p.
- JACKSON, R.D., IDSO, S.B., Reginato, R.J., PINTER, P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resour. Res.*, 17:1133-1138.
- JACKSON, R.D., PINTER, P.J., REGINATO, R.J., IDSO S.-B., 1986. Detection of Plant Stresses for Crop Management Decisions, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(1):99-106.
- KUMAR, M., MONTEITH, J.L., 1981. *Remote sensing of crop growth*. in *Plants and the day light spectrum.*, Ed. by Smith H., Academic Press, p. 133-144.
- MCCREE, K.-J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data, *Agric. Meteorol.*, 10:443-453.
- MEYNARD, J.-M., SEBILLOTTE, M., 1994. *L'élaboration du rendement du blé, base pour l'étude des autres céréales de tables*, Un Point sur... in *Élaboration du rendement des principales cultures annuelles*, INRA Editions. p. 31-51.

- MILLOT, M., 1995. *NOAA-AVHRR Pre-Processing*. Workshop for Central and Eastern Europe on Agrometeorological models : Theory and Applications in the MARS Project, 21-25 November 1994, Ispra, Italy, Publication EUR 16008 EN of the Office for Official Publications of the EU Luxembourg, 246 p. 173-179.
- MONTEITH, J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *J App. Ecol.*, vol 19, 747-766.
- MORAN, M.S., CLARKE, T.R., INOUE, Y., VIDAL, A., 1994. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation Between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index, *Remote Sens. Environ.* 49:246-263.
- RUSSELL, G., WILSON, G.W., 1994. *An agro-pedo-climatological knowledge-base of wheat in Europe*, Publication EUR 15789 EN of the Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, 157 p.
- VAN DIEPEN, C.A., WOLF, J., VAN KEULEN, H., RAPPOLDT, C., 1989. WOFOST : a simulation model of crop production, *Soils use and management*, 5 (1):16-24.
- VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME, R., CHARTIER, M., ARTIS, P., 1982. Efficience de la conversion énergétique de l'énergie solaire par un couvert végétal, *Acta Oecologica Oecologia Plantarum*, 3 (17):3-26.
- VIGNOLLES, C., 1997. Modélisation de la production agricole à moyenne échelle - Apport du couplage des mesures par satellite à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle, *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse, 307 p.
- VOSSSEN, P., RIJKS, D., 1995. Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre. Publication EUR 16318 EN of the *Office for Official Publication of the EU* Luxembourg, 179 p.

Mémorial de la météorologie nationale

Publié sous la direction de M. J. Bessemoulin
Directeur de la météorologie nationale

Climatologie de la France
Sélection de données statistiques
par M. Garnier 1967

Extraits

Les grands hivers en France

- 763-764** Hiver très rigoureux au cours duquel la mer fut gelée sur nos côtes. Dans l'intérieur de la Gaule, des froids extraordinaires furent signalés du début d'octobre 763 à la fin février 764. En certaines contrées de notre pays, il serait tombé, au dire des historiens, jusqu'à 10 mètres de neige.
- 1324-1325** Hiver très rigoureux dans le Nord de la France. La Seine gela deux fois et au cours de la débâcle les deux ponts de bois de Paris furent emportés.
- 1543-1544** L'hiver fut si rigoureux en Bretagne que la plupart des plantes gelèrent jusqu'à la racine. Dans le Nord du pays le froid fut si vif en décembre et au début de janvier qu'il fallait couper le vin dans les muids à coup de hache et le vendre au poids.

Les grands étés en France

- 1282** En Alsace, les pauvres mangeaient du blé nouveau deux semaines avant la fête de Saint-Jean-Baptiste (24 juin) et des potirons à la Sainte-Marguerite (20 juillet). La vendange eut lieu avant la fête de la Sainte-Croix (14 septembre).
- 1420** Année très chaude en Lorraine où les fraises sont mûres dès le 19 avril, les cerises le 9 mai et les raisins le 18 juin ; le 22 juillet on boit du vin nouveau.
- 1681** La sécheresse fut si grande et si générale dans toute la France qu'il n'y eut point de diocèse où les évêques et chapitres n'ordonnassent des prières publiques et des processions générales pour la conservation des biens de la terre.